

既有大跨度混凝土拱桥震害机理分析^①

唐 堂^{1,2}, 钱永久¹

(1.西南交通大学土木学院,四川 成都 610031; 2.四川华腾公路试验检测有限责任公司,四川 成都 611730)

摘要:以汶川地震中遭到严重破坏的金花大桥作为工程实例,基于现场震害调查资料和数值分析来研究金花大桥地震破坏机理。现场震害调查发现,金花大桥震害主要集中在主拱肋和拱上立柱,表现为混凝土开裂和拱上立柱环向裂缝等。数值分析结果表明,在地震荷载作用下主拱肋的拱脚截面抗弯能力比地震需求小,会出现弯曲破坏,拱顶截面抗震能力满足抗震需求;8[#]拱上立柱在柱底会发生弯曲开裂。数值分析结果与震害调查具有一致性,可为大跨度拱桥抗震设计提供参考。

关键词:上承式混凝土拱桥;震害;机理分析

中图分类号: U448.22

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2016)05-0701-06

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2016.05.0701

Mechanism of Seismic Damage of a Large-span Concrete Arch Bridge

TANG Tang^{1,2}, QIAN Yong-jiu¹

(1.School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, Sichuan, China;

2.Sichuan Huateng Highway Engineering Test Checking Co., Ltd., Chengdu 611730, Sichuan, China)

Abstract: The study of the damage mechanism of bridges is an important procedure that turns seismic damage investigation results into a practical technology. The damage features of arch bridges during the Wenchuan earthquake of 2008 differ from those of other earthquakes. Based on the data collected from the Wenchuan earthquake, the seismic damage mechanism of the Jinhua bridge was studied through post-earthquake investigation and numerical analysis. From the site-damage survey, it was found that the Jinhua bridge damage was mainly concentrated in the main rib and arch column, showing mainly concrete cracking and ring cracks of the arch column. The damage mechanism of the rib arch and arch column was simulated by FEM analysis, and the simulation results showed that under seismic loads, the flexural capacity of the spring cross-section of the main rib arch did not meet seismic requirements, while that of the vault cross-section did meet the requirements; flexural cracking appeared at the bottom section of the 8[#] arch column. It was concluded that the simulation results agreed well with post-earthquake investigation, and they can provide references for the seismic design of long-span arch bridges in mountainous areas with higher intensity. This paper also proposes some countermeasures for bridge design and construction techniques to minimize typical earthquake damage, and hopes to provide references for future bridge construction.

Key words: deck-type concrete arch bridge; seismic damage; mechanism analysis

① 收稿日期:2015-09-01

基金项目:国家自然科学基金项目(51178395);四川省交通运输厅公路局(2011C21-4-1)

作者简介:唐 堂(1983-),男,博士研究生,从事桥梁检测与加固研究。E-mail:447248080@qq.com。

0 引言

我国西南地区多为高地震烈度的山区,地形、地貌和地质条件复杂,山区桥梁结构通常采用大跨度钢筋混凝土拱桥。在世界范围内的历次大地震中,大跨度拱桥表现出来的震害普遍较少,地震风险尚未完全彰显,对其震害认识还有待进一步提高。1995年日本 Kobe 地震中,位于震区的西宫港大桥(主跨为 252 m 的钢系杆拱桥)第一跨引桥因相对位移过大而脱落,另一座主跨 214 m 钢拱桥发生了铸钢支座移位破坏和拱上风撑屈曲破坏^[1]。2008年“5·12”四川汶川地震中,灾区多座大跨径混凝土

拱桥发生了不同程度的震害,其中金花大桥、白水河大桥震害十分典型,这为深入了解该类型桥梁震害机理提供了重要的实例。近年来,不少学者对拱桥的振动问题进行比较深入的研究,取得了一系列成果^[2-4]。但研究重点主要针对中承式拱桥,对大跨度混凝土拱桥的研究较少。本文将以震害严重的金花大桥为研究对象来分析其震害破坏机理。

1 桥梁震害概况

1.1 金花大桥震害

绵竹金花大桥(图 1、图 2)主桥为 1×150 m 钢筋混凝土双肋拱桥。主拱采用 C40 钢筋混凝土等

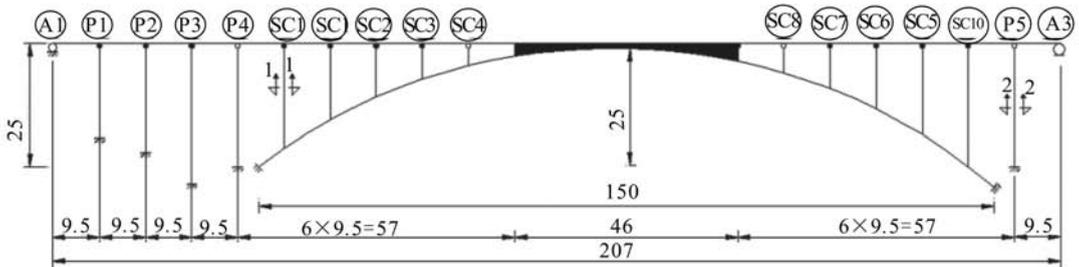


图 1 金花大桥立面示意图(单位:m)

Fig.1 Elevation drawing of Jinhua Bridge (Unit:m)

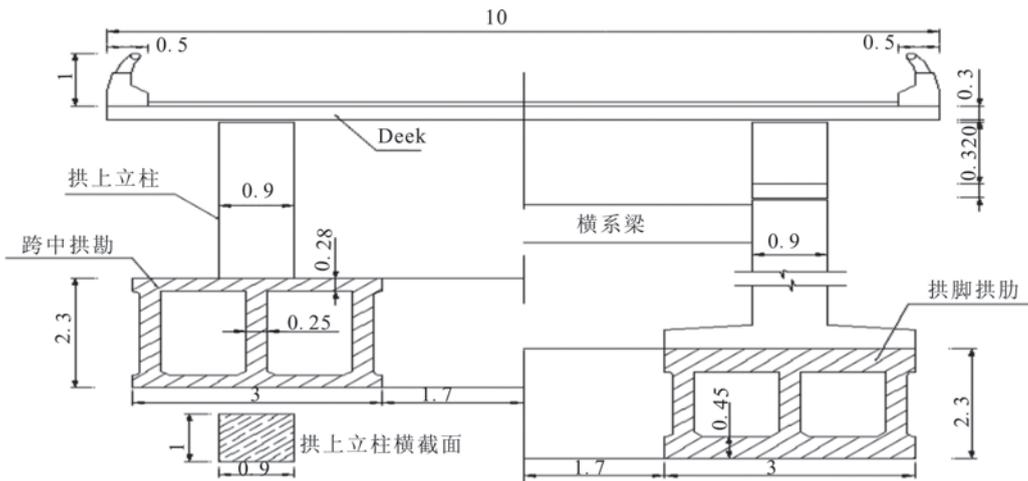


图 2 金花大桥横断面图(单位:m)

Fig.2 Cross section map of Jinhua Bridge (Unit:m)

截面悬链线箱形双肋拱,净跨径 150 m,拱轴系数 $m=2.111$,矢跨比 $f/L=1/6$,肋间中距 6.4 m。单肋截面为双箱双室,箱宽 3.0 m,箱高 2.3 m;顶板厚 0.28 m,底板厚 0.25 m,顶底板在拱脚 18 m 区段按线形分别逐渐加厚到 0.48 m 和 0.45 m,腹板为 3 m×0.25 m。拱上立柱和引孔墩柱为 C30 钢筋混凝土结构。支座采用板式橡胶支座或聚四氟乙烯滑板支座。下部结构为重力式墩台、钻孔灌注桩基础。

汶川地震后,金花大桥主桥各构件发生了不同程度震害,主要表现为拱肋拱脚底板弯曲裂缝和腹板剪切裂缝;拱上立柱底座与拱肋交接处环线裂缝;纵梁与垫梁冲击碰撞明显,导致混凝土剥落和斜向裂缝^①。金花大桥及其震害如图 3 所示。

① 绵竹金花大桥检测报告.成都:四川华腾公路试验检测有限责任公司,2008.



图 3 金花大桥及其震害

Fig.3 Jinhua Bridge and its seismic damage

1.2 白水河大桥震害

G212 线白水河大桥为 3×90 m 钢筋混凝土箱型拱桥。在汶川地震中其震害有:第 1 跨广元侧拱脚截面拱腹横向开裂;第 1 腹拱变形破坏和拱上横墙底座剪切破坏^②。白水河大桥及其震害如图 4 所示。



图 4 白水河大桥及其震害

Fig.3 Baishuihe Bridge and its seismic damage

1.3 其他大跨度上承式混凝土拱桥震害

广元市青川县境内 S105 线的井田坝拱桥为 2×85 m 箱形拱桥。在地震中其拱圈断裂,造成全桥垮塌(图 5)。广元市 G212 广元至姚渡洛阳河大桥为 1×100 m 箱型拱桥,震后基本保持完整,无明显震害(图 6)^[5]。



图 5 井田坝拱桥垮塌

Fig.5 Collapse of Jintianba Bridge



图 6 洛阳河大桥

Fig.6 Luoyanghe Bridge

2 金花大桥建模及自振特性

金花大桥在汶川地震中遭受了十分典型的大跨度上承式混凝土拱桥破坏,本文将采用非线性时程分析方法对其震害进行数值模拟和震害机理分析。

2.1 金花大桥分析计算模型

运用大型有限元软件 SAP2000 建立全桥模型(图 7)。在计算模型中,主拱肋、纵梁、垫梁采用空间梁单元模拟,桥面板采用板壳单元模拟;拱上立柱的弹塑性模型在其柱底和柱顶设置塑形铰,铰的恢复力特性由弯矩-轴力相互作用的屈服面定义。全桥模型包括 200 个梁单元和 150 个板单元。根据结构实际支撑情况和场地条件,拱肋边界条件取与地基固结,拱上立柱与主拱肋采用刚性连接,拱上立柱与纵梁连接采用板式橡胶支座或聚四氟乙烯滑板支座连接。

板式橡胶支座恢复力模型如图 8 所示,竖向刚

② 白水河大桥检测报告.成都:四川华腾公路试验检测有限责任公司,2008.

度取值 $k = 660 \text{ MZ} \cdot \text{m}^{-1}$ 。聚四氟乙烯橡胶支座的恢复力模型采用双线性模型, $SD_x = 6.6 \times 10^5 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$, $SD_y = SD_z = 1\,437 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$, 支座旋转刚度取值为 0。计算模型中考虑地震时桥面板与桥台之间、引桥与主桥之间和纵梁和垫梁之间的碰撞效应。在 SAP2000 中采用 GAP 单元模拟伸缩缝, 刚度取值 $k = 5.76 \times 10^7 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$, 单元缝隙 $\text{open} = 0.044 \text{ m}$, 如图 9 所示。



图 7 金花大桥有限元计算模型

Fig.7 The finite element calculation model of Jinhua Bridge

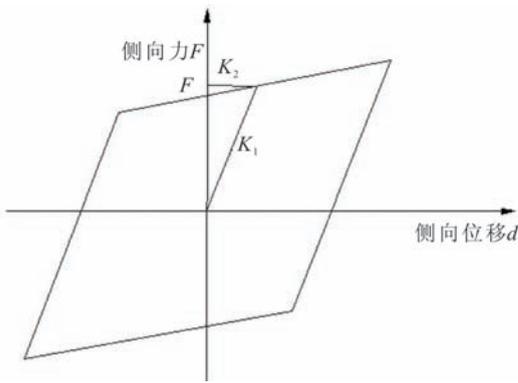


图 8 滑板支座恢复力模型

Fig.8 Restoring force model of the laminated rubber bearings

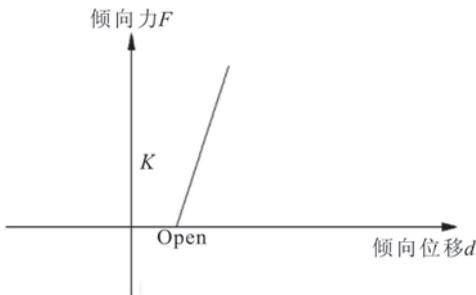


图 9 伸缩缝采用 GAP 模型力-位移示意图

Fig.9 Force-displacement schematic of expansion joints using GAP model

2.2 金花大桥自振特性

大跨度拱桥的动力特性分析是进行地震反应分析和抗震设计的基础, 对了解桥梁的地震反应特性和确定阻尼系数有十分重要的影响。金花大桥主拱平面内前 4 阶振型(图 10)的频率和振型特征如表 2 所列。

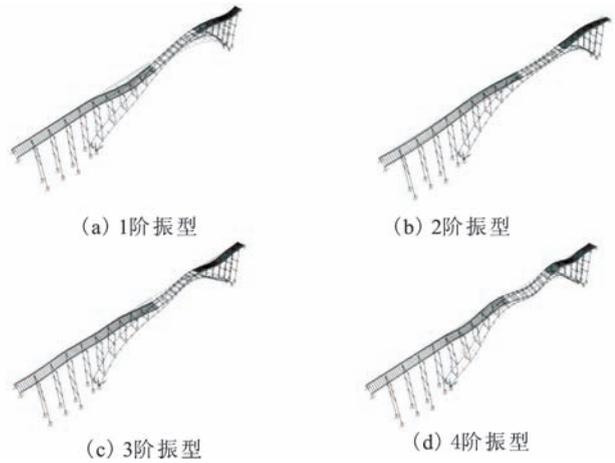


图 10 金花大桥模型前 4 阶振型

Fig.10 The first four vibration modes of Jinhua Bridge

表 1 金花大桥的动力特性

Table 1 Dynamic characteristics of Jinhua Bridge

序号	频率 f / Hz	振型特点
1	1.819	拱肋反对称竖弯
2	2.106	拱肋正对称竖弯
3	3.977	拱肋反对称竖弯
4	5.702	拱肋正对称竖弯

3 金花大桥震害机理分析

为研究金花大桥的地震破坏机理, 考虑拱上立柱塑性、支座和伸缩缝的非线性。首先, 对拱肋进行抗震性能验算, 分析在实测地震波作用下主拱圈控制截面的抗震能力是否满足地震需求; 其次, 对震害突出的拱上立柱进行抗震能力和地震需求分析。

3.1 输入地震动

选取汶川地震中什邡八角站记录的 NS 方向加速度时程数据得到的地震波(图 11), 并结合地震动谱加速度衰减模型^[6](采用 SEISMOSIGNAL 软件)求得桥址场地地震波的 PGA 数值为 $0.49g$ 。为减少计算时间、便于对比分析, 选取 44 s 时的地震波进行计算, 时间间隔为 0.01 s。为考虑竖向地震动, 本次计算中竖向输入为纵向输入的 0.65 倍^[7-8]。

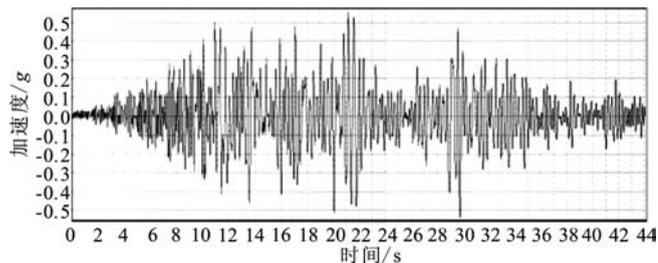


图 11 汶川波加速度时程曲线

Fig.11 Acceleration time-history curve of Wenchuan seismic waves

3.2 主拱圈抗震性能计算

大跨度上承式混凝土拱桥主拱圈裂缝分纵向和横向两种形式,横向开裂一般出现在拱顶或拱脚截面,纵向开裂较少出现。拱顶和拱脚截面是拱桥的设计控制截面,在静力荷载作用下这两处截面的弯矩最大,容易成为抗震设计的薄弱环节,尤其是拱桥处于弯矩形状突变部位,易出现弯曲开裂病害。金花大桥拱脚截面和拱顶截面控制在地震荷载下的内力和变形如表 2 所列。

表 2 地震波作用下拱桥控制截面地震响应

Table 2 Seismic waves under control section bridge response

拱脚截面内力		拱顶截面内力	
轴力/kN	弯矩/(kN·m)	轴力/kN	弯矩/(kN·m)
1.796×10^4	3.887×10^4	1.249×10^4	2.340×10^4

拱肋的抗弯强度采用纤维截面 XTRACT 软件计算。本次震害典型的 2# 拱肋拱脚截面抗弯能力计算见图 12。拱肋拱脚的屈服弯矩约为 36 692 kN·m(地震需求的最大弯矩为 3.887×10^4 kN·m),其截面抗震能力比地震需求小,因此发生弯曲破坏,这与桥梁实际检测震害一致。拱肋拱顶的屈服弯矩约为 26 040 kN·m(地震需求的最大弯矩为 2.340×10^4 kN·m),其截面抗震能力虽均比地震需求略大,说明拱肋的拱脚截面即使未弯曲屈曲,但会发生弯曲开裂。

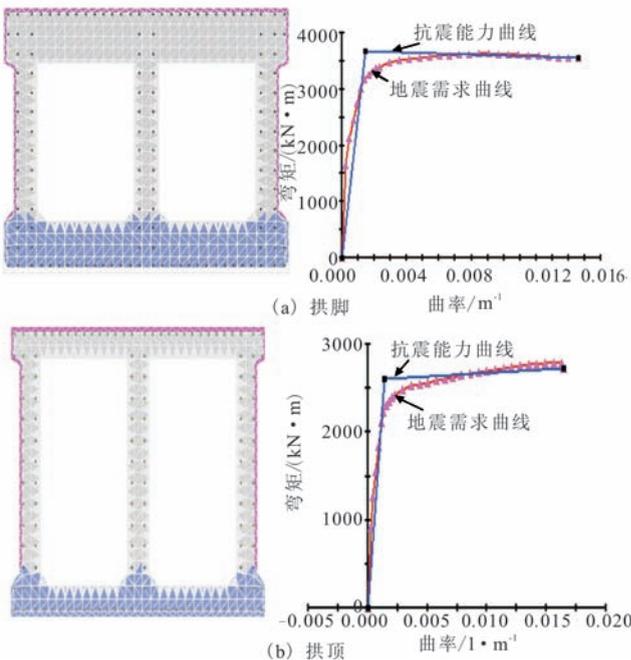


图 12 拱脚及拱顶截面弯矩-曲率关系

Fig.12 Moment-curvature relationship of the spring and vault cross-section

3.3 拱上立柱抗震性能计算

拱上立柱是大跨径上承式拱桥的易损构件,其中拱上立柱与主拱圈连接部位的开裂是很常见的震害,主要是由于它们的结构形式不同,导致彼此间震动变形不协调而产生裂缝。同时相关资料表明,在平面上拱上立柱对拱肋的横向振动尤其是弯曲振动产生约束,同时拱上立柱将出现较大的内力响应,并可能出现不同程度的震害。根据金花大桥实际震害,8# 立柱底部由于受较地震荷载作用导致其底部出现环向裂缝。金花大桥 8# 拱上立柱在地震荷载下的地震需求如表 3 所列。

表 3 8# 拱上立柱地震需求

Table 3 Seismic demand of 8# arch column

立柱	剪力/kN	弯矩/(kN·m)
8# 拱上立柱	3.60×10^2	9.35×10^2

拱上立柱的抗弯强度采用纤维截面件 XTRACT 软件计算,截面约束混凝土应力-应变本构关系采用 Mander 模型,钢筋本构关系采用考虑强化段的抛物线模型。选取本次震害典型的 8# 拱上立柱截面抗弯能力进行计算。在重力荷载作用下,8# 拱上立柱轴力 N 约为 980 kN,基于截面分析得到立柱弯矩-曲率关系图如图 13 所示。该立柱的屈服弯矩约为 1 030 kN·m,假定反弯点位于拱上立柱的跨中处,则计算得到屈服剪力为 919 kN。8# 拱上立柱抗震能力大于地震需求(935 kN·m),在汶川地震波作用下,该立柱底部不会发生弯曲屈曲,但会出现弯曲开裂。

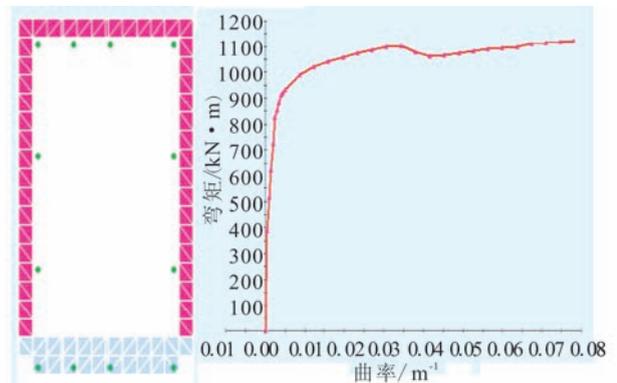


图 13 8# 拱上立柱立柱弯矩-曲率关系

Fig.13 Moment-curvature relationship of 8# arch column

4 结论

本文介绍了汶川地震中大跨度上承式混凝土拱桥震害情况,结合现场检测,利用数值模拟分析了金花大桥的地震破坏机理。认为:(1)地震时拱上立

柱,特别是靠近拱顶附件的立柱是地震易损构件,承担了很大的地震惯性力;(2)在地震波荷载作用下,拱圈拱脚截面发生了弯曲破坏,在抗震设计和抗震加固中应重点关注

参考文献(References)

- [1] 范立础,胡世德,叶爱君.大跨度桥梁抗震设计[M].北京:人民交通出版社,2001:141-142.
FAN Li-chu, HU Shi-de, YE Ai-jun. Seismic Design of Large-span Bridge[M]. Beijing, China Communications Press, 2001: 141-142. (in Chinese)
- [2] 李涛.大跨度钢管混凝土拱桥的抗震分析[J].公路,1996(1): 10-13.
LI Tao. Seismic Analysis of Large-span Concrete-filled Steel Tubular Arch Bridge[J]. Highway, 1996(1): 10-13. (in Chinese)
- [3] Navy A S. Stability and Load-carrying Capacity of Three Dimensional Long Span Steel Arch[J]. Computer and Structure, 1997, 65(6): 857-868.
- [4] 王君杰,王前信.大跨度拱桥在空间变化地震动下的响应[J]. 振动工程学报,1995,8(2):119-125.
WANG Jun-jie, WANG Qian-xing. In Response to Large-span Arch Bridge in the Spatial Variation of Ground Motions[J]. Journal of Vibration Engineering, 1995, 8(2): 119-125. (in Chinese)
- [5] 庄卫林,陈乐生.汶川地震公路震害分析:桥梁与隧道[M].北京:人民交通出版社,2013.
ZHUANG Wei-lin, CHEN Le-sheng. Analysis of Highway's Damage in the Wenchuan Earthquake: Bridge and Tunnel[M]. Beijing: China Communications Press, 2013. (in Chinese)
- [6] Zhao J X, Zhang J, Asano, et al. Attenuation Relations of Strong Ground Motion in Japan Using Site Classification Based on Rredominant Period[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2006, 96(3): 898-913.
- [7] 楼梦麟,张静.大跨度拱桥地震响应分析中阻尼模型的讨论[J]. 振动与冲击, 2009, 28(5): 22-26.
LOU Meng-lin, ZHANG Jing. Discussion on Damping Model for Seismic Response Analysis of Long-span Bridge[J]. Journal of Vibration and Shock, 2009, 28(5): 22-26. (in Chinese)
- [8] 李建明.铁路多跨矮塔斜拉桥抗震性能评估[J].地震工程学报, 2014, 36(1): 34-38.
LI Jian-ming. Evaluation of Seismic Performance of a Railway Cable-stayed Bridge with Multi-span and Low Towers[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2014, 36(1): 34-38. (in Chinese)